

BAB III

OPTIMASI KETEBALAN TABUNG COPV

3.1 Metodologi Optimasi Desain Tabung COPV

Pada tahap proses mengoptimasi desain tabung COPV kita perlu mengidentifikasi masalah terlebih dahulu, setelah itu melakukan tahap studi literatur. Pada tahap ini kita mencari dan mempelajari bagaimana metode atau cara mengoptimasi desain tabung biogas, terutama cara menentukan ketebalan serat komposit untuk tabung COPV. Kemudian memasukkan geometri desain bejana tekan yang sudah ada yang telah dibuat oleh Fernanda, 2010 pada tugas akhir sebelumnya. Setelah memasukkan geometri desain bejana tekan yang sudah ada, tahap selanjutnya adalah optimasi ketebalan *liner*, *flens* dan komposit untuk tabung COPV. Pada tahap ini geometri desain bejana yang sudah ada dimodelkan pada *software SolidWorks* untuk selanjutnya disimulasikan dengan pembebanan berupa tekanan sebesar 220 bar.

Di samping itu, kita juga perlu melakukan validasi metode simulasi yang dilakukan dengan membandingkan perhitungan secara manual. Selanjutnya hasil dari simulasi dianalisa apakah tegangan struktur di bawah tegangan yang diizinkan atau tidak. Apabila tidak, lakukan beberapa kali percobaan dengan mengubah besar ketebalan *liner*, *flens* dan komposit sampai tegangan struktur di bawah tegangan yang diizinkan dan nilai *Factor of Safety* (FOS) lebih besar sama dengan 3.5. Hasil dari desain yang telah memenuhi kriteria selanjutnya dikumpulkan untuk dianalisa dan kemudian dipilihlah desain dengan tambahan kriteria dengan massa yang paling ringan.

3.2 Identifikasi Masalah

Permasalahan utama yang akan dibahas dalam penelitian tugas akhir ini adalah bagaimana menentukan ketebalan serat komposit dan *cylinder liner* untuk tabung COPV dengan material yaitu aluminium-*cotton fiber* dan baja karbon-*cotton fiber* dengan tekanan operasi sebesar 200 bar sehingga dapat diperoleh desain bejana tekan yang aman untuk digunakan.

3.3 Studi Literatur

Berdasarkan studi literatur yang telah dilakukan dari beberapa sumber, ada beberapa metode atau cara untuk menentukan ketebalan serat komposit untuk tabung COPV diantaranya sebagai berikut:

1. Metode *Weibull Strength Theory*

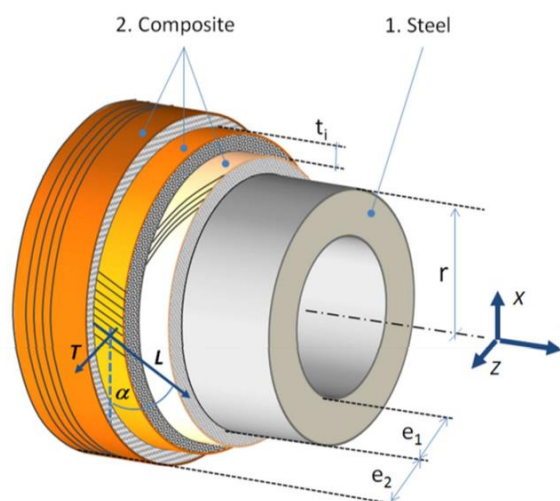
Pada metode ini dijelaskan bahwa ketebalan komposit untuk *pressure vessel* bergantung pada seberapa panjang komposit tersebut. Namun semakin panjang komposit yang berarti semakin tebal lapisan pada bejana tekan bukan berarti akan menjadi semakin kuat. Maka dari itu untuk mengoptimasi ketebalannya digunakan metode *Weibull Strength Theory*. Pada metode ini ketebalan serat komposit yang tebal dimodelkan oleh *Weibull Strength Theory* dan terindikasi bahwa terdapat reduksi *Ultimate Strength* pada ketebalan komposit yang tebal tersebut. Maka dari itu dengan metode ini kita bisa mengetahui nilai optimasi ketebalan serat komposit untuk tabung COPV. [7]

2. Metode Iterasi dengan Variasi Ketebalan

Pada metode ini cara menentukan tebal komposit untuk tabung COPV yaitu dengan menentukan variasi ketebalan tabung untuk diiterasi dengan memodelkannya dan mensimulasikannya dengan *software* di komputer. Kemudian dianalisis hasilnya dan dipilih ketebalan yang paling optimal berdasarkan beberapa kriteria yang telah ditentukan. [12]

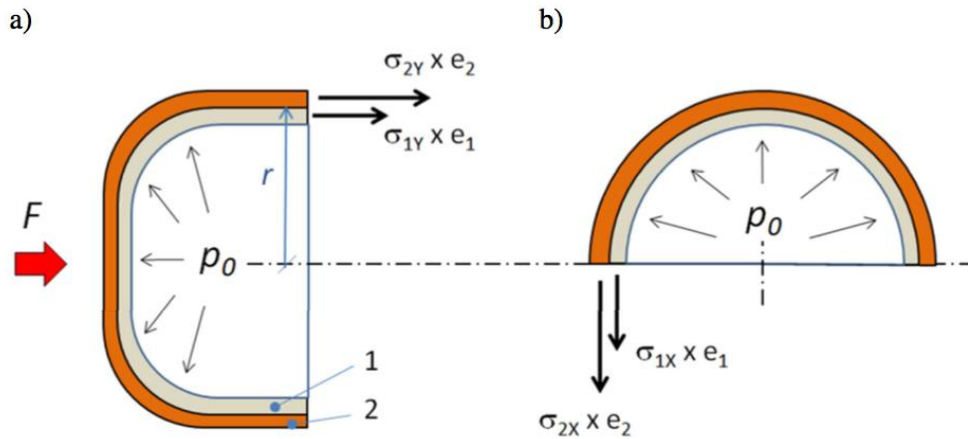
3. Metode Perhitungan Manual

Pada metode ini cara yang digunakan untuk menentukan ketebalan komposit untuk tabung COPV yaitu dengan menggunakan perhitungan manual. [8] Berikut persamaan yang digunakan yaitu:



Gambar 3.1 Geometri model COPV [8]

$$\left. \begin{aligned} 1 \times 2(e_1\sigma_{1X} + e_2\sigma_{2X}) &= 1 \times 2r \times p_0 \\ 2\pi r(e_1\sigma_{1Y} + e_2\sigma_{2Y}) &= \pi r^2 p_0 - F \end{aligned} \right\} \quad (1)$$



Gambar 3.2 a) arah axial b) arah hoop [8]

Persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi:

$$\begin{cases} e_1\sigma_{1X} + e_2\sigma_{2X} = p_0 r \\ e_1\sigma_{1Y} + e_2\sigma_{2Y} = p_0 \frac{r}{2} - \frac{F}{2\pi r} \end{cases} \quad (2)$$

Setelah mengetahui beberapa metode untuk menentukan ketebalan komposit pada tabung COPV, penulis memilih untuk menggunakan metode yang ke-2 yaitu metode iterasi dengan variasi ketebalan. Hal ini dipilih karena menjadi metode yang lebih sederhana dibandingkan dengan metode lainnya.

3.4 Input Geometri Desain Bejana Tekan

Pada tahap ini, desain geometri bejana tekan yang telah dibuat pada tugas akhir sebelumnya oleh Fernanda, 2010 akan menjadi *template* dan tolak ukur untuk percobaan dan proses selanjutnya. Adapun desain dan geometri bejana tekan tersebut meliputi:

1. Spesifikasi Umum

Volume tabung	: 12,74 liter
Kapasitas	: 0,84 kg pada tekanan 100 bar setara dengan 1 kg Gas LPG
Tekanan rancangan	: 100 bar
Beban yang ditahan	: 50% dari total beban di dinding tabung. Perkiraan tebal dari komposit sebut ijuk ditambah polyester yang dapat menahan 50% dari total beban di dinding adalah 69 mm.

2. Spesifikasi Desain *Cylinder Liner*

a) *Cylinder Liner* :

1. Material : AISI 304
2. Panjang (l) : 1000 mm
3. Diameter Dalam (d_i) : 101,6 mm
4. Diameter Luar (d_o) : 103,2 mm

b) *Flens*

Flens Bagian Bawah :

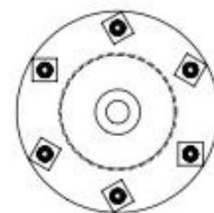
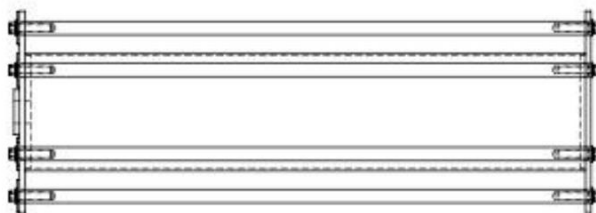
1. Material : AISI 304
2. Tebal (l) : 10 mm
3. Diameter (d) : 180mm

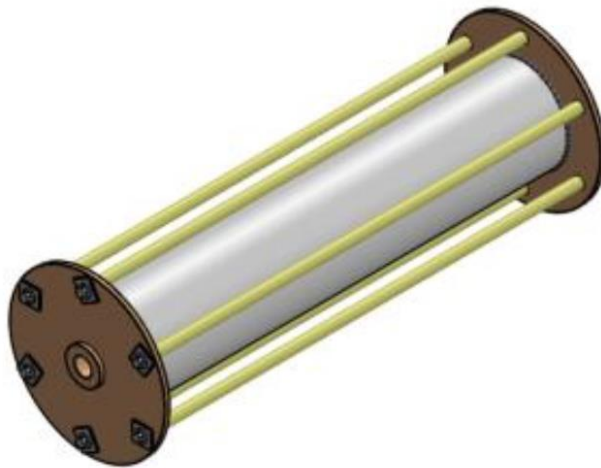
Flens Bagian Atas :

1. Material : AISI 304
2. Tebal (l) : 15 mm
3. Diameter (d) : 180mm

c) Batang Penguat

1. Material : AISI 304
2. Tebal (l) : 10 mm
3. Diameter (d) : 180mm





Gambar 3.3 *Assembly Desain*

3.5 Optimasi Ketebalan *Liner*, *Flens* dan Komposit

Untuk menentukan bagaimana cara mengoptimasi ketebalan *liner*, *flens* dan komposit pada tabung COPV, hal yang pertama-tama dilakukan adalah memodelkan desain geometri dari data yang sudah ada, kemudian disimulasikan pada *software SolidWorks* untuk dilihat nilai dari tegangannya, FOSnya, *Displacement*-nya, *Strain*-nya dan sebagainya. Apabila dengan geometri yang sudah ada ditambahkan dengan variasi ketebalan komposit dan disimulasikan namun tidak memenuhi kriteria, maka dibuatlah variasi ketebalan untuk *flens* dan *liner*.

Di samping itu perlu divalidasi apakah metode FEA (*Finite Element Analysis*) yang dilakukan sudah sesuai dan benar? Hal ini dapat dibuktikan dengan membandingkan hasil perhitungan sederhana secara manual dengan hasil pemodelan dan simulasi di komputer dengan menggunakan *software SolidWorks*. Berikut di bawah ini contoh perhitungan untuk membuktikan atau memvalidasi kebenaran metode yang dilakukan:

Soal

1. Bejana silinder berdinding tipis mempunyai diameter dalam 75 mm, panjang bejana 250 mm dan tebal dinding 2.5 mm. Bejana tersebut akan dikenai tekanan internal sebesar 7 MN/m^2 . Hitunglah besar tegangan bejana tersebut!

Jawaban :

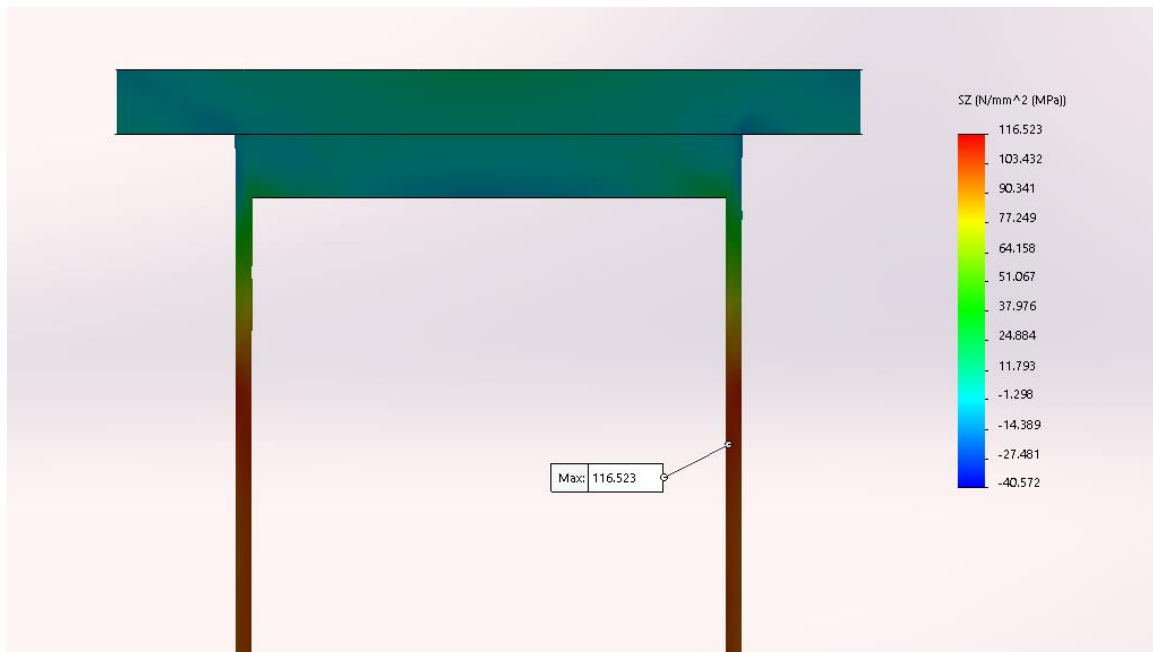
- Tegangan *hoop*

$$\begin{aligned}\sigma_h &= (p d)/(2 t) \\ &= (7 \times 10^6 \times 75 \times 10^{-3})/(2 \times 2.5 \times 10^{-3}) \\ &= 105 \text{ MN/m}^2\end{aligned}$$

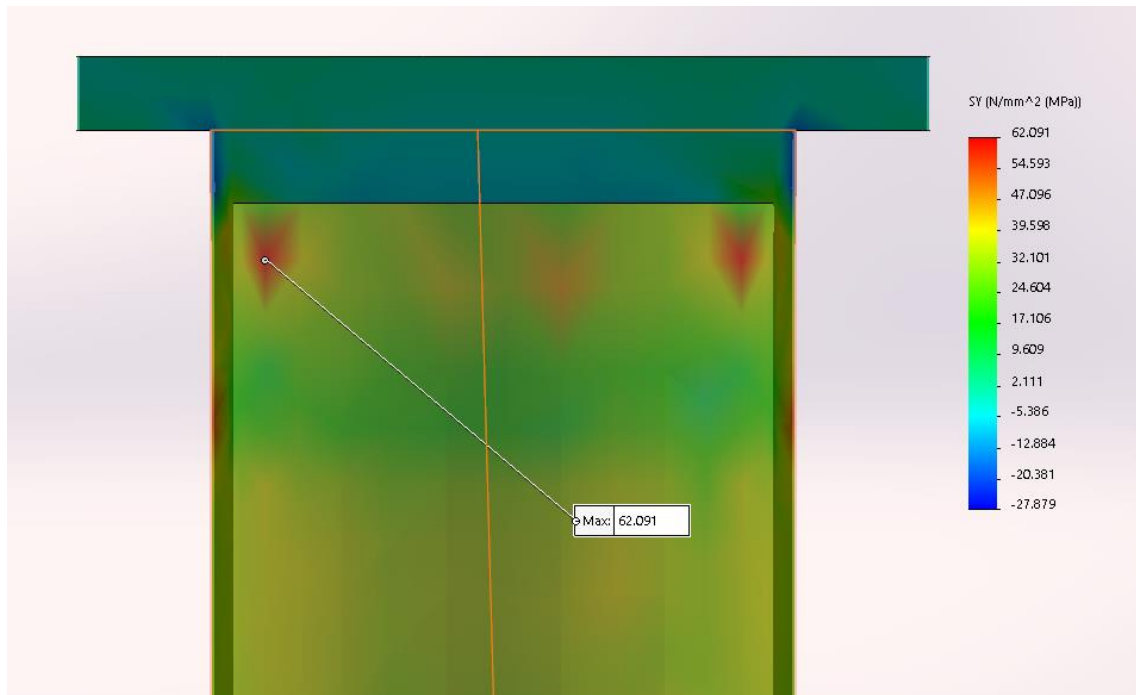
- Tegangan *longitudinal*

$$\begin{aligned}\sigma_l &= (p d)/(4 t) \\ &= (7 \times 10^6 \times 75 \times 10^{-3})/(4 \times 2.5 \times 10^{-3}) \\ &= 52.5 \text{ MN/m}^2\end{aligned}$$

Berdasarkan soal di atas, apabila dimodelkan dalam *software SolidWorks* kemudian disimulasikan untuk mendapatkan besar tegangan pada bejana yaitu sebagai berikut:



Gambar 3.4 *Hoop Stress*



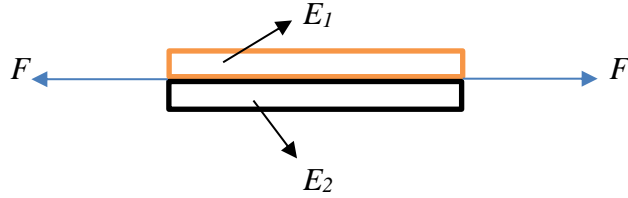
Gambar 3.5 Longitudinal Stress

Berdasarkan perbandingan di atas antara perhitungan manual dan pemodelan elemen hingga, dapat disimpulkan bahwa hasilnya tidak begitu jauh perbedaannya. Pada hasil pemodelan atau simulasi untuk tegangan arah *hoop* didapatkan nilai tegangan sebesar 116.523 Mpa, sementara hasil dari perhitungan didapatkan nilai tegangan sebesar 105 Mpa. Untuk tegangan arah *longitudinal* dari hasil simulasi didapat nilai tegangan sebesar 62.091 Mpa dan berdasarkan hasil perhitungan didapat nilai tegangan sebesar 52.5 Mpa. Hasil yang diperoleh tidak begitu jauh berbeda dengan hasil yang didapat dengan cara perhitungan manual dengan menggunakan persamaan. Dalam hal ini perbedaan nilai tegangan masih bisa ditoleransi. Maka dari itu dapat dikatakan metode pemodelan untuk pengujian yang dilakukan sudah benar.

2. Bejana silinder berdinding tipis terbuat dari tembaga mempunyai diameter internal 150 mm dan tebal dinding 4 mm akan diselubungi oleh pita baja satu lapis yang memiliki ketebalan 1.5 mm, pita akan dikenakan pada saat tidak ada tekanan pada bejana. Hitung tegangan *hoop* pada pita baja dan pada silinder apabila bejana dikenakan tekanan internal 3.5 MN/m^2 . Tembaga memiliki $E = 100 \text{ GN/m}^2$ sedangkan baja $E = 200 \text{ GN/m}^2$.

Jawaban :

Asumsi, apabila dua buah plat dengan material yang berbeda disatukan bertumpuk dan diberi gaya F pada masing-masing ujungnya, maka akan terjadi regangan pada kedua material tersebut yang dianggap nilai dari regangan kedua material saat diberi gaya yaitu sama.



$$\sigma = \frac{F}{A_1 + A_2} \quad (1)$$

Dengan asumsi besar pertambahan panjang antara dua meterial sama, maka dapat disimpulkan bahwa besar reganganpun juga sama

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2)$$

$$\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 \quad (3)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} \quad (4)$$

$$\sigma_2 = E_2 \varepsilon_2 \quad (5)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} \quad (6)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 \quad (7)$$

$$\frac{\sigma_1}{E_1} = \frac{\sigma_2}{E_2} \quad (8)$$

$$\sigma_1 = \frac{E_1}{E_2} \sigma_2 \quad (9)$$

Dengan :

F = Gaya tarik (N)

E_1 = Modulus elastisitas tembaga (GN/m^2)

E_2 = Modulus elastisitas baja (GN/m^2)

A_1 = Luas penampang tembaga (m^2)

A_2 = Luas penampang tembaga (m^2)

σ = Tegangan (N/m^2)

ε = Regangan

l = Panjang batang (m)

Δl = Pertambahan panjang batang (m)

Dengan demikian, untuk menghitung nilai tegangan pada tembaga dan pita baja, digunakan persamaan lain yaitu :

$$e_1\sigma_1 + e_2\sigma_2 = P_0r \quad (10)$$

Dengan :

e_1 = Tebal silinder bejana (m)

e_2 = Tebal lapisan bejana (m)

σ_1 = Tegangan pada silinder (N/m^2)

σ_2 = Tegangan pada lapisan bejana (N/m^2)

P_0 = Tekanan internal gas (N/m^2)

r = Jari-jari silinder (m)

$$e_1\sigma_1 + e_2\sigma_2 = P_0r$$

$$e_1 \frac{E_1}{E_2} \sigma_2 + e_2\sigma_2 = P_0r$$

$$4 \times 10^{-3} \frac{100 \times 10^9}{200 \times 10^9} \sigma_2 + 1.5 \times 10^{-3} \sigma_2 = 3.5 \times 10^6 \times 79 \times 10^{-3}$$

$$2\sigma_2 + 1.5\sigma_2 = 275.5 \times 10^6$$

$$3.5\sigma_2 = 275.5 \times 10^6$$

$$\sigma_2 = 79 \times 10^6 \text{ Pa} = 79 \text{ MPa}$$

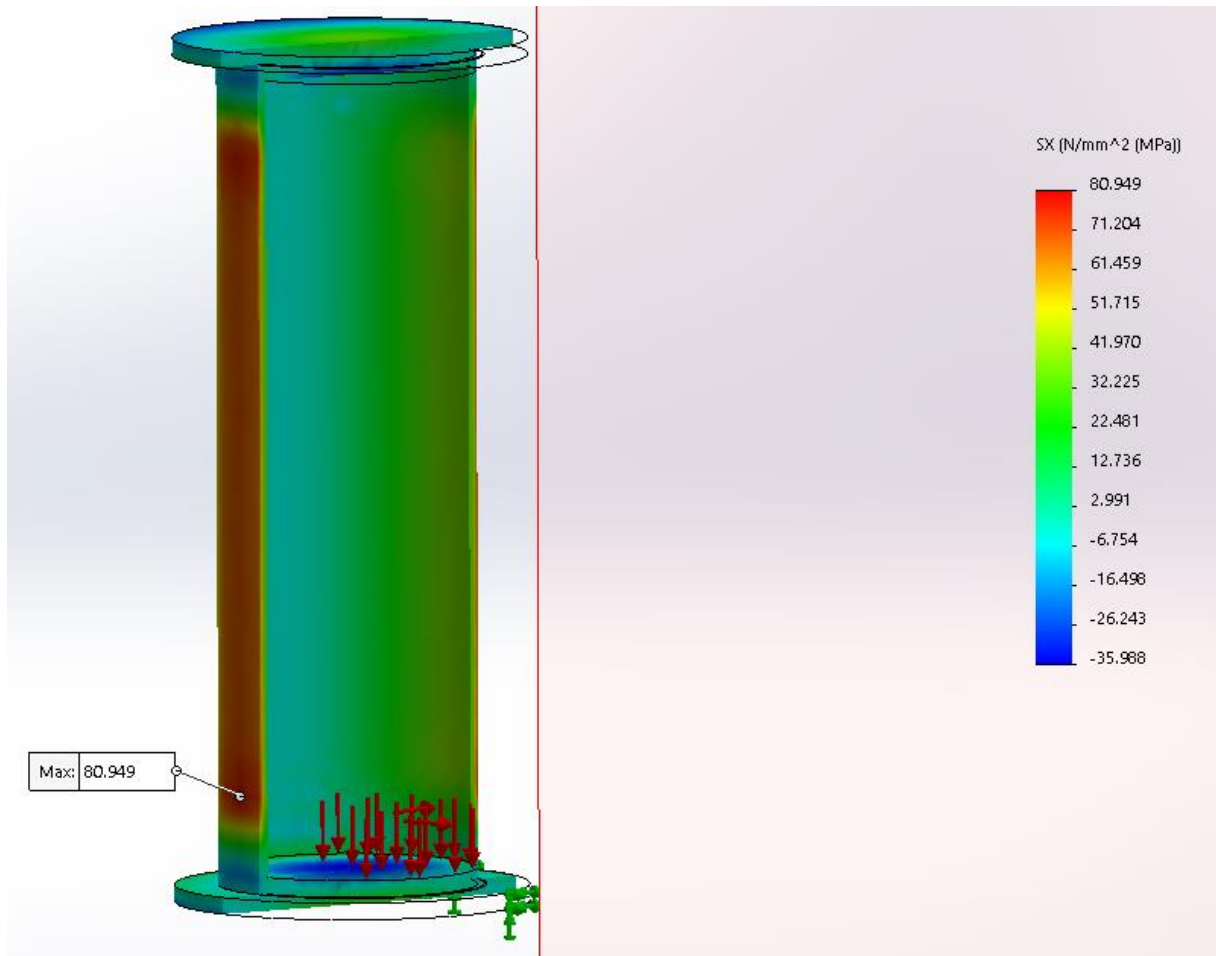
Substitusi hasil tersebut pada persamaan (9)

$$\sigma_1 = \frac{E_1}{E_2} \sigma_2$$

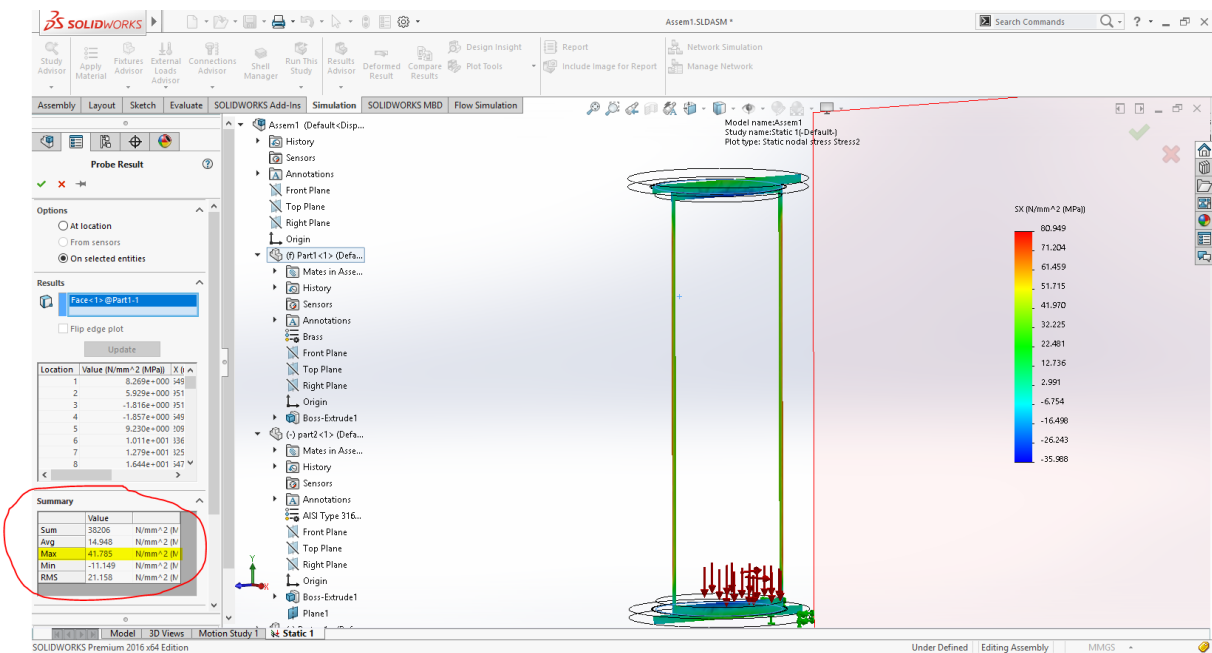
$$\sigma_1 = \frac{100 \times 10^9}{200 \times 10^9} 79 \times 10^6$$

$$\sigma_1 = 39.5 \times 10^6 \text{ Pa} = 39.5 \text{ MPa}$$

Berdasarkan soal di atas, apabila dimodelkan dalam *software SolidWorks* kemudian disimulasikan untuk mendapatkan besar tegangan pada bejana yaitu sebagai berikut:



Gambar 3.6 Tegangan *hoop* pada lapisan pita baja



Gambar 3.7 Tegangan *hoop* pada silinder bejana

Berdasarkan perbandingan di atas antara perhitungan manual dan pemodelan elemen hingga, dapat disimpulkan bahwa hasilnya tidak begitu jauh perbedaannya. Pada hasil pemodelan atau simulasi untuk tegangan arah *hoop* pada pita baja didapat nilai tegangan sebesar 80.949 Mpa, sementara hasil dari perhitungan didapatkan nilai tegangan sebesar 79 Mpa. Untuk tegangan arah *hoop* dari hasil simulasi didapat nilai tegangan sebesar 41.785 Mpa dan berdasarkan hasil perhitungan didapat nilai tegangan sebesar 39.5 Mpa. Hasil yang diperoleh tidak begitu jauh berbeda dengan hasil yang didapat dengan cara perhitungan manual dengan menggunakan persamaan. Dalam hal ini perbedaan nilai tegangan masih bisa ditoleransi. Maka dari itu dapat dikatakan metode pemodelan untuk pengujian yang dilakukan sudah benar.

Berikut di bawah ini merupakan properti material untuk Aluminium, ST 37 dan *Cotton Fiber* sebagai data untuk simulasi yang dilakukan pada aplikasi SolidWorks. Data-data tersebut diambil dari jurnal penelitian yang telah melakukan pengujian untuk mengetahui properti material-material tersebut.

Material	Elastic Modulus (N/m ²)	Poisson's Ratio	Shear Modulus (N/m ²)	Mass Density (kg/m ³)	Tensile Strength (N/m ²)	Yield Strength (N/m ²)	Thermal Expansion (K ⁻¹)	Thermal Conductivity (W/m.K)	Specific Heat (J/kg.K)
Aluminium Alloy (6061)	6.0e+010	0.33	2.6e+010	2700	124084000	55148500	2.4e-005	170	1300
ST-37 (DIN 10490)	2.1e+011	0.28	7.9e+010	7800	3.7e+08	2.75e+08	1.1e-005	14	440
<i>Cotton Fiber (with epoxy)</i>	1.85e+08	0.35	3.189e+08	1540	4.753e+07	3049000	232	0.2256	1386

Tabel 3.1 *Material propertys*

Pada kondisi kali ini, pengujian dilakukan kurang lebih sebanyak 30 kali dengan variasi ketebalan masing-masing 15 variasi untuk material Aluminium-*Cotton fiber* dan ST 37-*Cotton Fiber*. Berikut merupakan hasil dari pengujian dengan variasi ketebalan untuk desain tabung COPV:

No	Tebal Flens (mm)	Tebal Liner (mm)	Tebal Komposit (mm)	Stress (MPa)	Strain	Displacement (mikron)	FOS	Massa (kg)
1	15	2	2	191.364	0.00838	812.97	0.25	3.47

2	38	2	8	32.32	0.00830	367.74	1.48	6.98
3	50	4	8	15.947	0.00350	169.78	3.00	9.24
4	50	3	7	14.95	0.00489	237.80	3.20	9.13
5	50	4	7	12.93	0.00300	170.23	3.70	9.93

Tabel 3.2 Hasil Iterasi Variasi Ketebalan Aluminium-Cotton Fiber

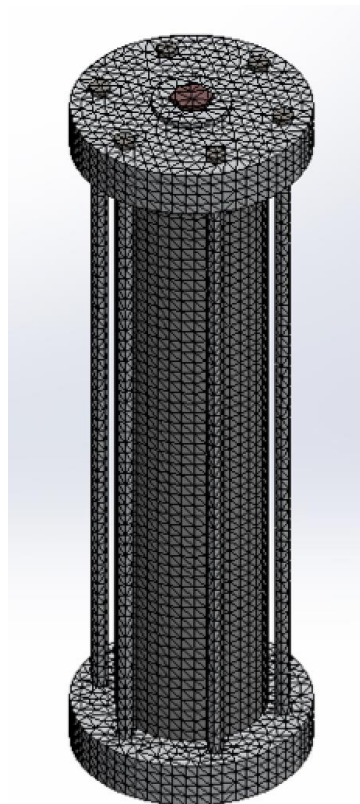
Melihat dari hasil iterasi untuk menentukan ketebalan *liner*, *flens* dan komposit pada bejana tekan dengan material Aluminium-Cotton Fiber, dipilihlah iterasi nomor lima dengan tebal *flens* 50 mm, tebal *liner* 4 mm dan tebal komposit 7 mm. Pemilihan tersebut dikarenakan melihat hasil dari *stress*, *strain*, *displacement*, FOS dan massa dari bejana tekan dengan ketebalan tersebut. Standar untuk FOS *pressure vessel* yaitu 3.5. Pada iterasi ke-5 nilai FOS yaitu 3.7 dan hanya itu yang memenuhi syarat dan paling dekat dengan standar FOS *pressure vessel* yaitu 3.5. Walaupun tebal *flens* sama pada iterasi 3 sampai dengan 5, namun dengan ketebalan *liner* dan komposit yang berbeda, menghasilkan nilai yang berbeda pula, selain itu tidak selamanya semakin tebal komposit akan semakin optimal.

No	Tebal <i>Flens</i> (mm)	Tebal <i>Liner</i> (mm)	Tebal Komposit (mm)	<i>Stress</i> (MPa)	<i>Strain</i>	<i>Displacement</i> (mikron)	FOS	Massa (kg)
1	15	1	1	226.65	0.00559	569.73	1.10	7.16
2	15	2	2	191.78	0.00305	344.03	1.30	8.57
3	32	2	2	67.38	0.00256	125.50	3.70	12.66
4	34	1	5	99.73	0.00536	222.43	2.50	12.80
5	34	2	3	60.81	0.00261	126.86	4.10	13.44

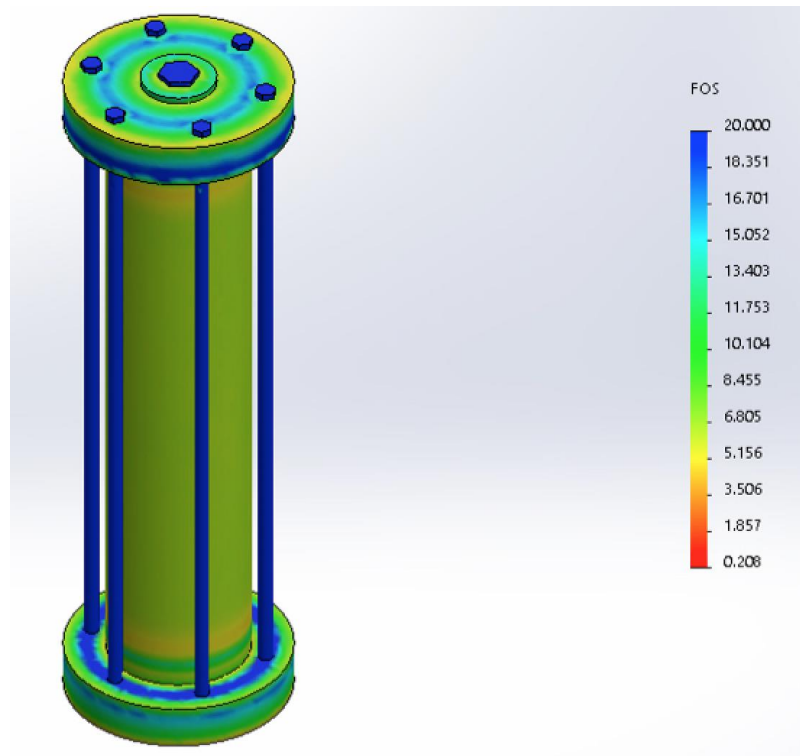
Tabel 3.3 Hasil Iterasi Variasi Ketebalan ST 37-Cotton Fiber

Melihat dari hasil iterasi untuk menentukan ketebalan *liner*, *flens* dan komposit pada bejana tekan dengan material ST 37-Cotton Fiber, dipilihlah iterasi nomor tiga dengan tebal *flens* 32 mm, tebal *liner* 2 mm dan tebal komposit 2 mm. Pemilihan tersebut dikarenakan melihat hasil dari *stress*, *strain*, *displacement*, FOS dan massa dari bejana tekan dengan ketebalan tersebut. Standar untuk FOS *pressure vessel* yaitu 3.5. Walaupun iterasi ke-5 memiliki nilai FOS lebih besar, namun apabila melihat pada massa, *stress* dan *displacement*-nya, ketebalan yang optimal yaitu pada iterasi ke-3.

Berdasarkan data-data di atas, dapat disimpulkan bahwa dengan ketebalan *liner* sebesar 4 mm, *flens* sebesar 50 mm dan serat komposit sebesar 7 mm merupakan ketebalan yang paling optimal untuk desain tabung COPV dengan material Aluminium-*Cotton Fiber*, dan ketebalan *liner* sebesar 2 mm, *flens* sebesar 32 mm dan serat komposit sebesar 2 mm merupakan ketebalan yang paling optimal untuk desain tabung COPV dengan material ST 37-*Cotton Fiber*. Hasil simulasi untuk tabung yang terpilih seperti terlihat di bawah ini dalam gambar berupa hasil *meshing* dan setelah masuk taham *Finitelement Analysis*.

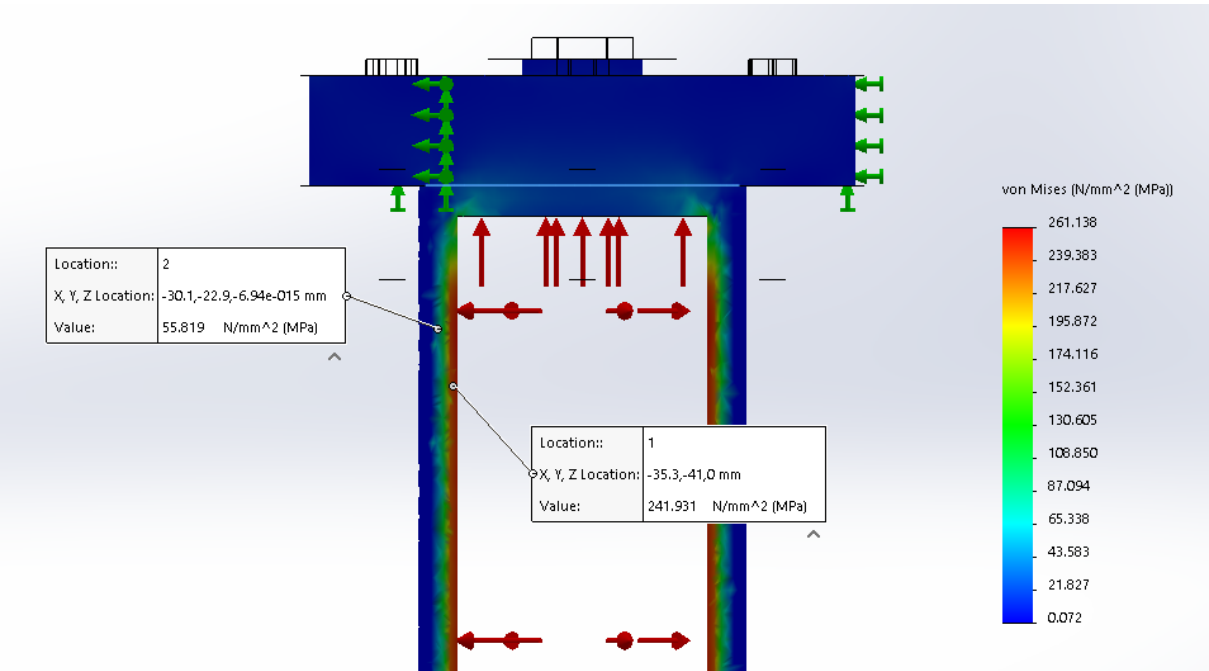


Gambar 3.8 *Mesh* Tabung COPV Aluminium-*Cotton Fiber*

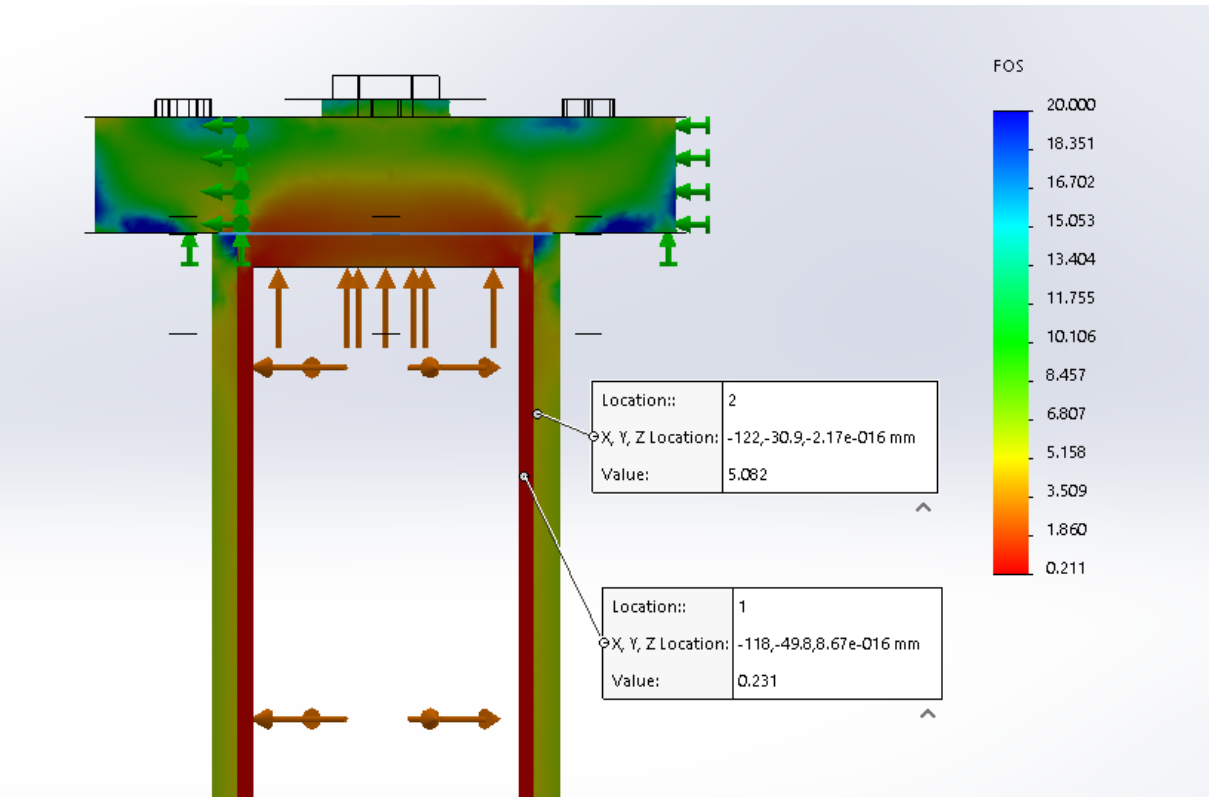


Gambar 3.9 FEA pada tabung COPV Aluminium-*Cotton Fiber*

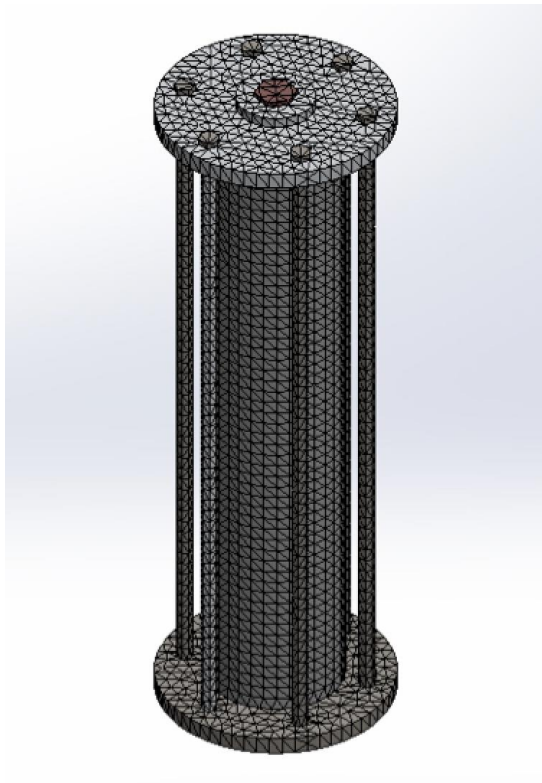
Terdapat perbandingan yang cukup besar antara tegangan pada komposit dan tegangan pada *liner* untuk material Aluminium-*Cotton Fiber* dengan perbandingan secara berturut-turut yaitu 55.819 MPa : 241.931 MPa atau apabila disederhanakan menjadi 1 : 4.33. Sedangkan perbandingan FOS pada *liner dan komposit* secara berturut-turut yaitu 0.231 : 5.082 atau apabila disederhanakan menjadi 1 : 22. Dengan ini bisa disimpulkan bahwa dengan adanya lapisan komposit, hal tersebut membuat bejana tekan semakin kuat dan menambah performa pada bejana apabila dibandingkan dengan bejana dengan ketebalan *liner* yang sama tanpa dilapisi komposit, seperti yang terlihat pada gambar 3.8 dan gambar 3.9 di bawah ini.



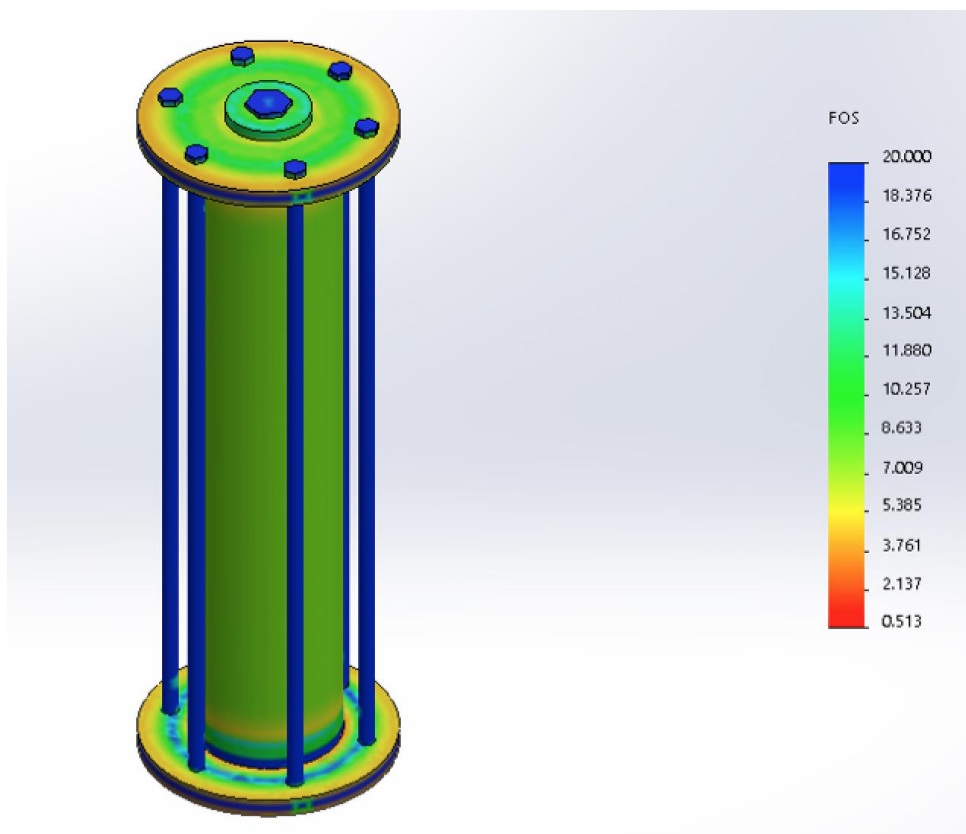
Gambar 3.10 Perbandingan tegangan pada *liner* dan komposit dengan material Aluminium-
Cotton Fiber



Gambar 3.11 Perbandingan FOS pada *liner* dan komposit dengan material Aluminium-
Cotton Fiber

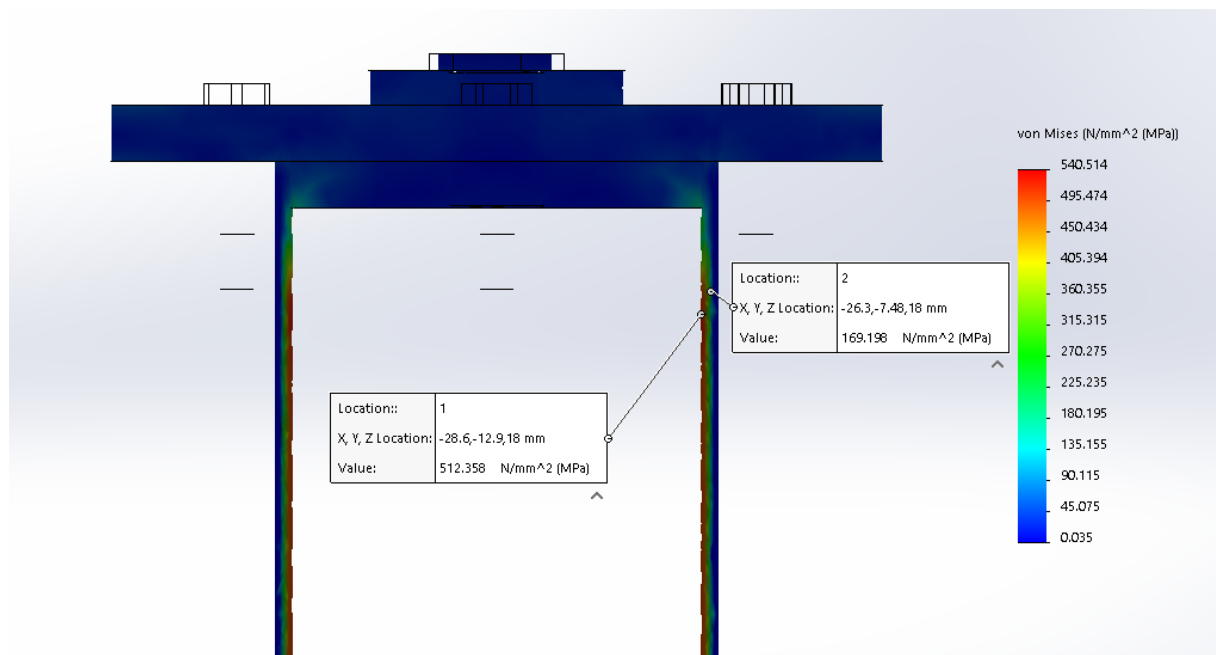


Gambar 3.12 *Mesh Tabung COPV ST 37-Cotton Fiber*

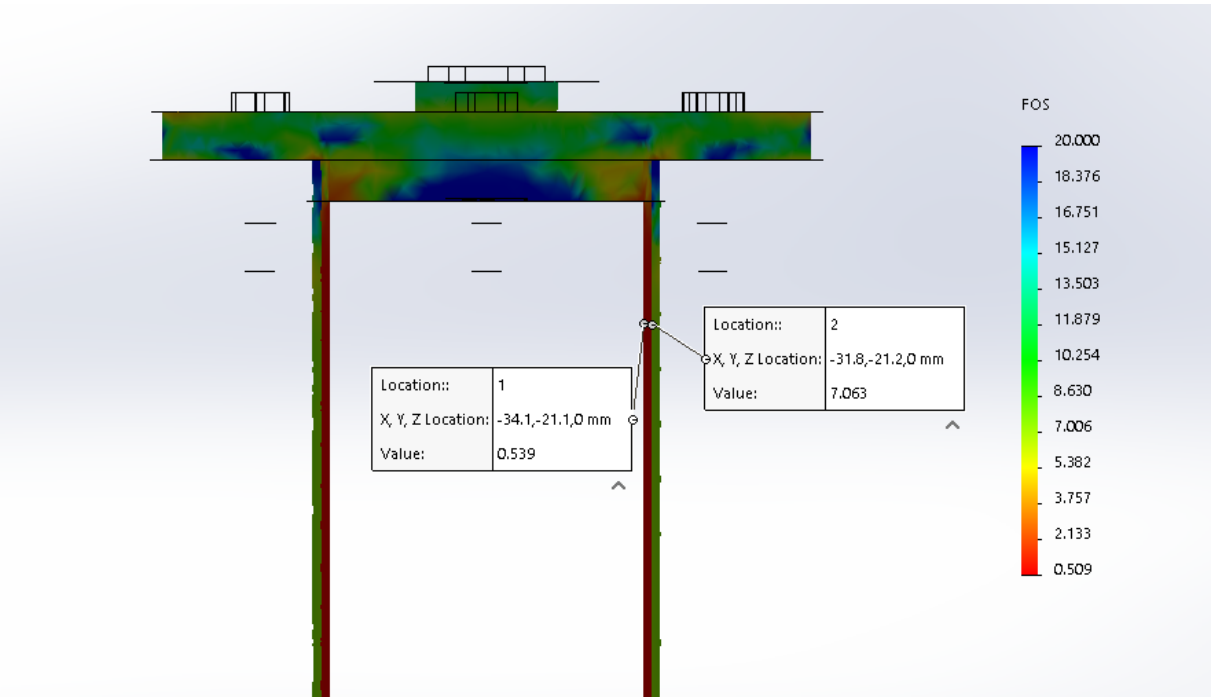


Gambar 3.13 FEA pada tabung COPV ST 37-Cotton Fiber

Terdapat perbandingan yang cukup besar antara tegangan pada komposit dan tegangan pada *liner* untuk material ST 37-Cotton Fiber dengan perbandingan secara berturut-turut yaitu 169.196 MPa : 512.358 MPa atau apabila disederhanakan menjadi 1 : 3.03. Sedangkan perbandingan FOS pada *liner dan komposit* secara berturut-turut yaitu 0.539 : 7.063 atau 1 : 13.1. Dengan ini bisa disimpulkan bahwa dengan adanya lapisan komposit, hal tersebut membuat bejana tekan semakin kuat dan menambah performa pada bejana apabila dibandingkan dengan bejana dengan ketebalan *liner* yang sama tanpa dilapisi komposit, seperti yang terlihat pada gambar 3.12 dan gambar 3.13 di bawah ini.

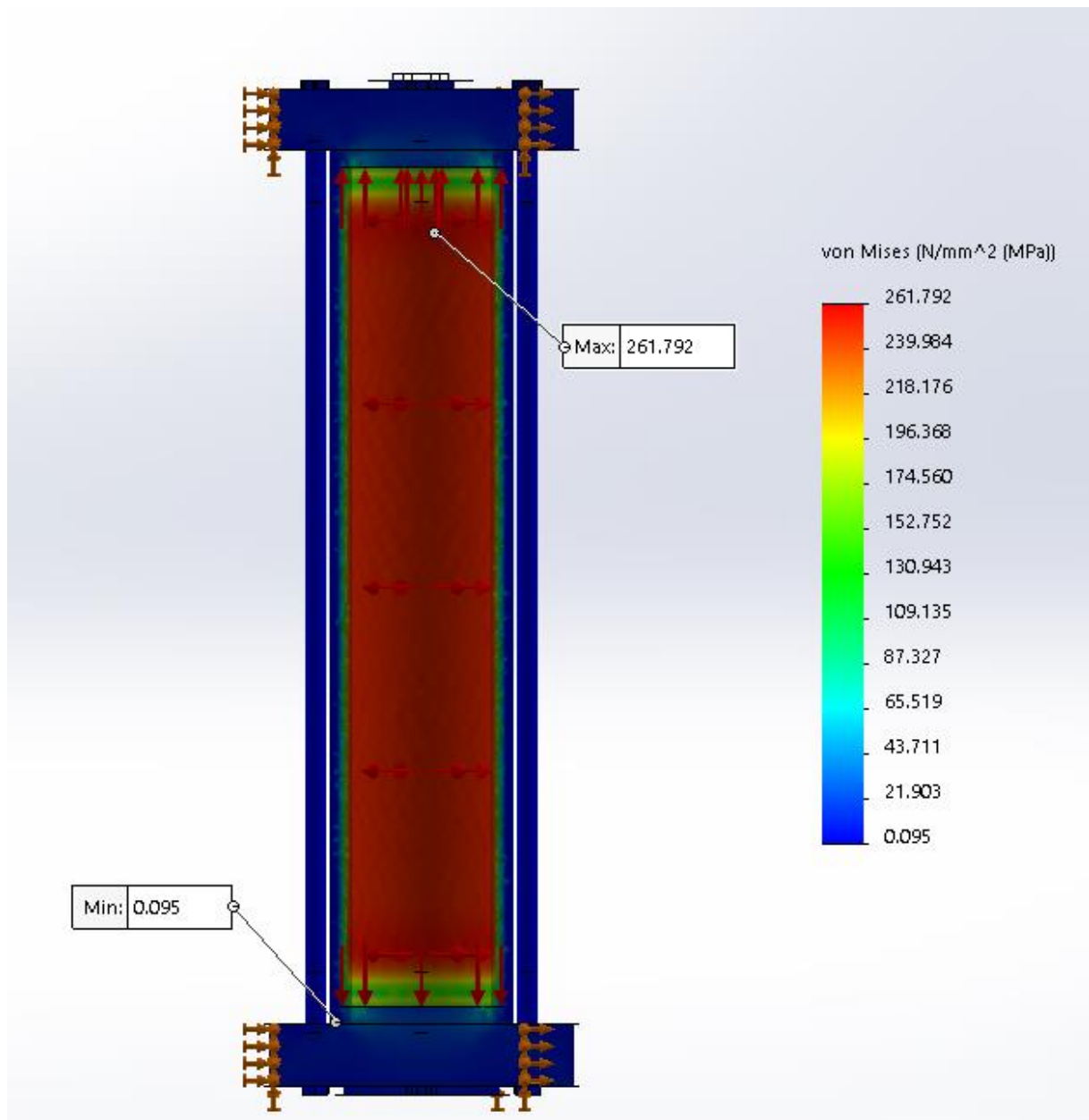


Gambar 3.14 Perbandingan tegangan pada *liner* dan komposit dengan material ST 37-Cotton Fiber

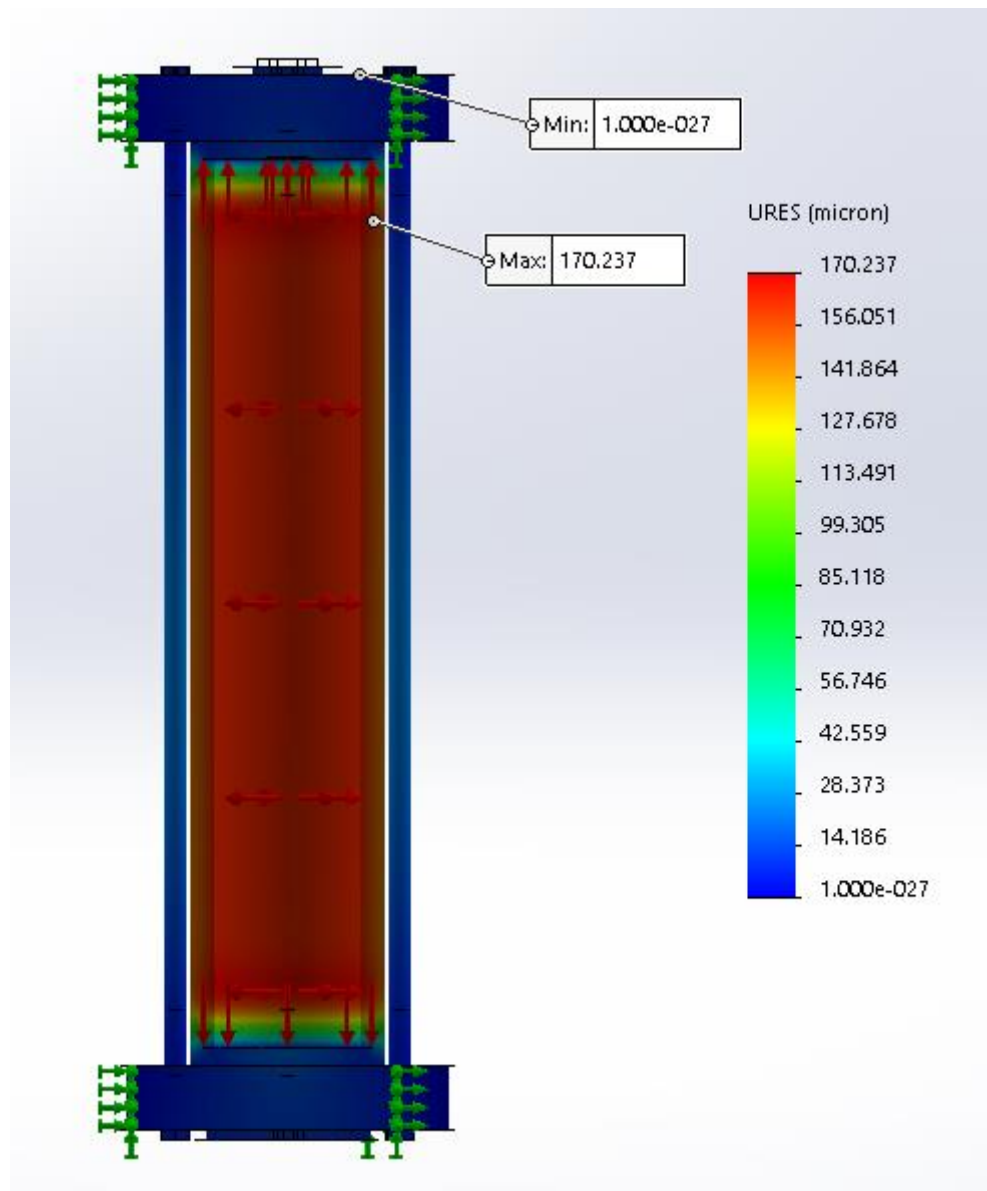


Gambar 3.15 Perbandingan FOS pada *liner* dan komposit dengan material ST 37-Cotton Fiber

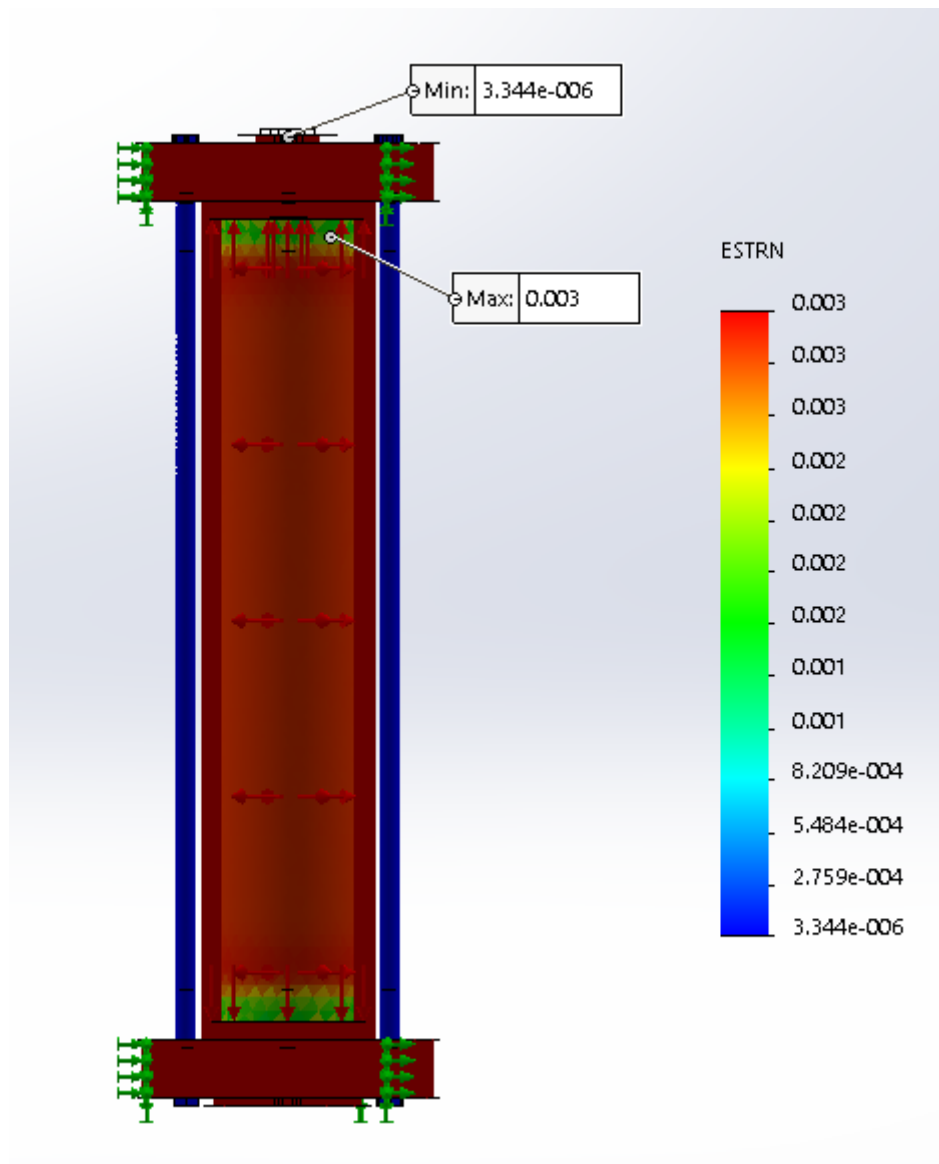
Berikut di bawah ini merupakan titik maksimal dan titik minimal dari *stress*, *displacement*, dan *strain* untuk tabung dengan material Aluminium-Cotton Fiber.



Gambar 3.16 Titik maksimal dan titik minimal tegangan yang terjadi pada bejana dengan material Aluminium-*Cotton Fiber*

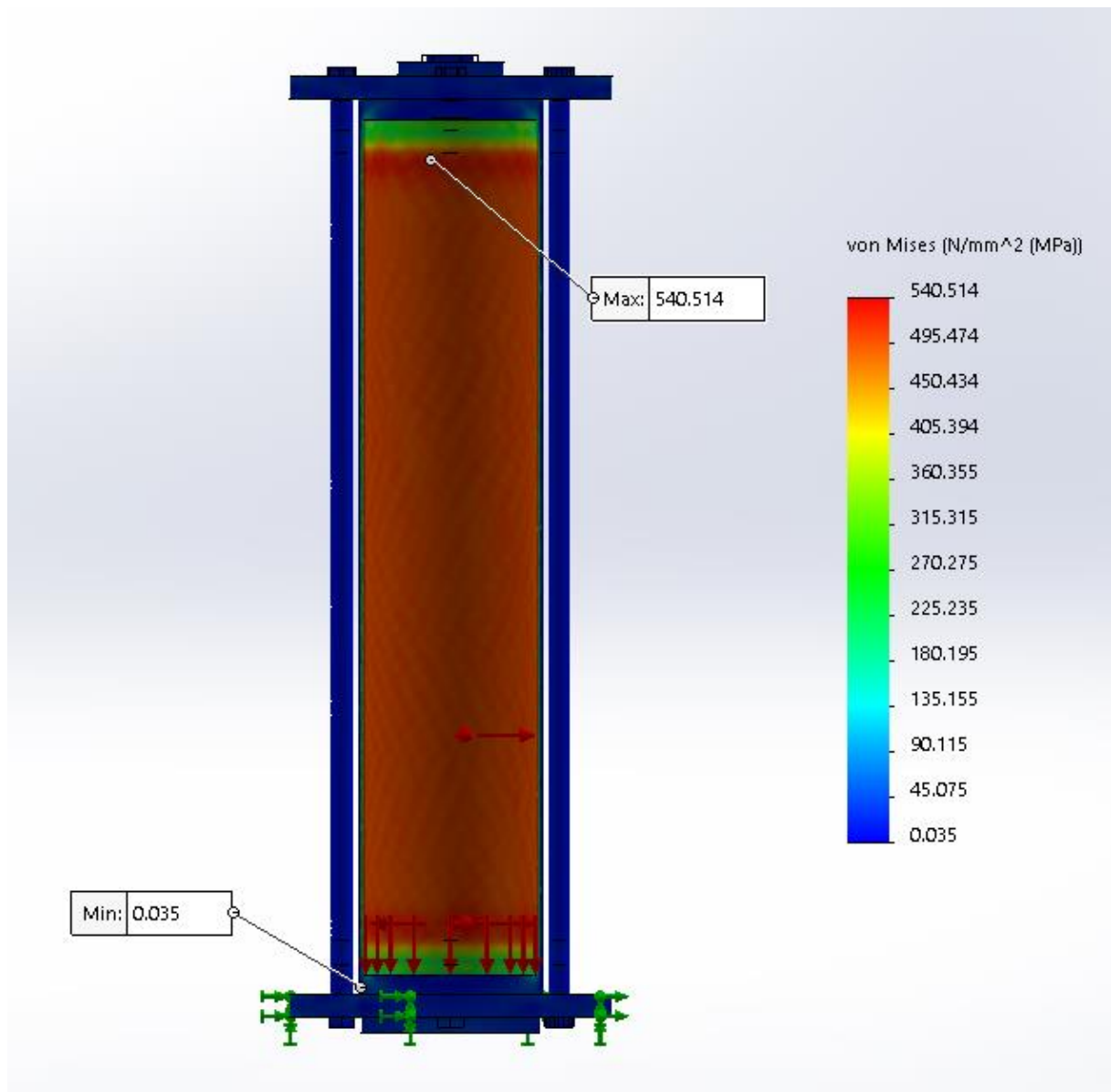


Gambar 3.17 Titik maksimal dan titik minimal *displacement* yang terjadi pada bejana dengan material Aluminium-Cotton Fiber

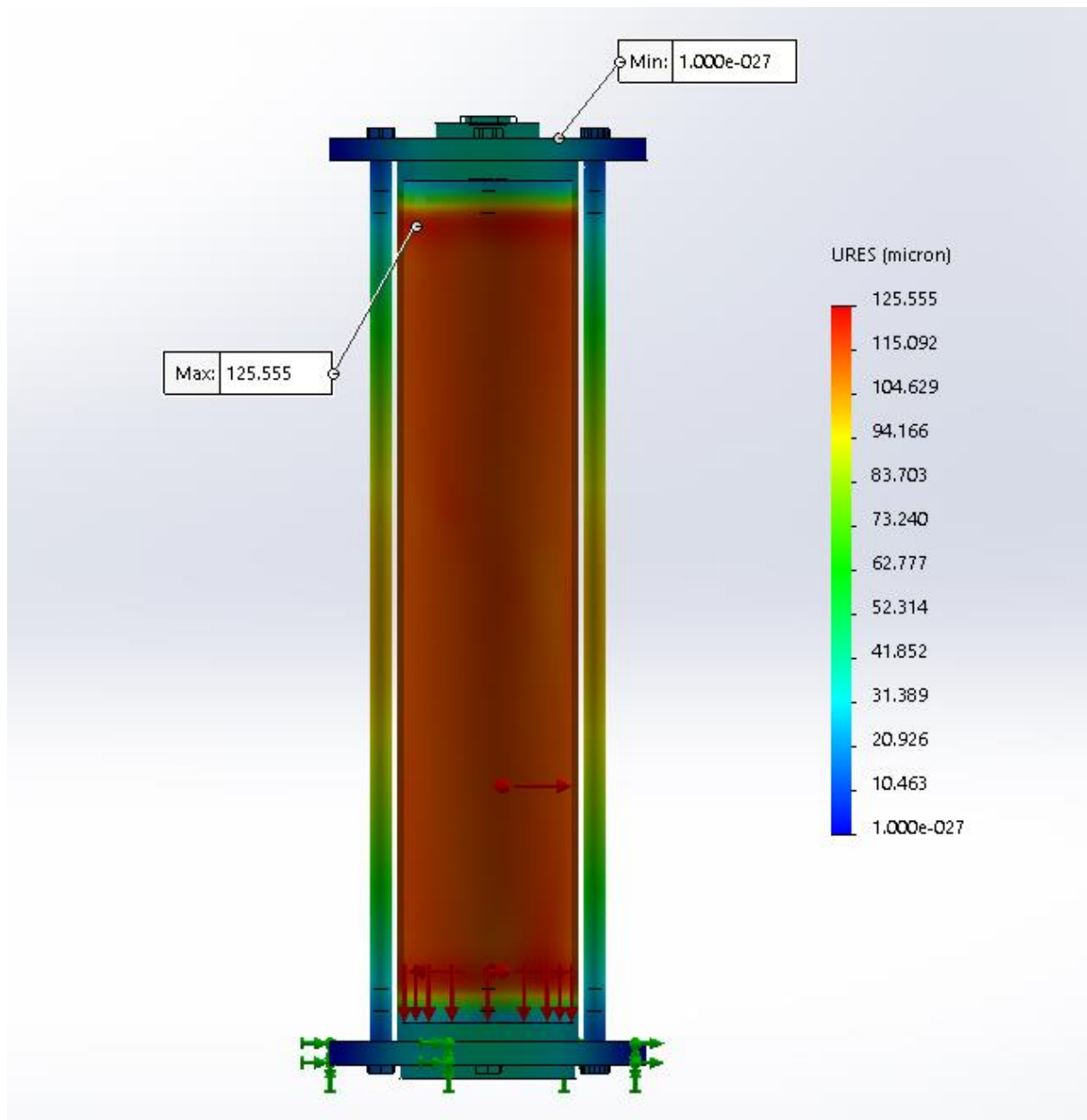


Gambar 3.18 Titik maksimal dan titik minimal regangan yang terjadi pada bejana dengan material Aluminium-*Cotton Fiber*

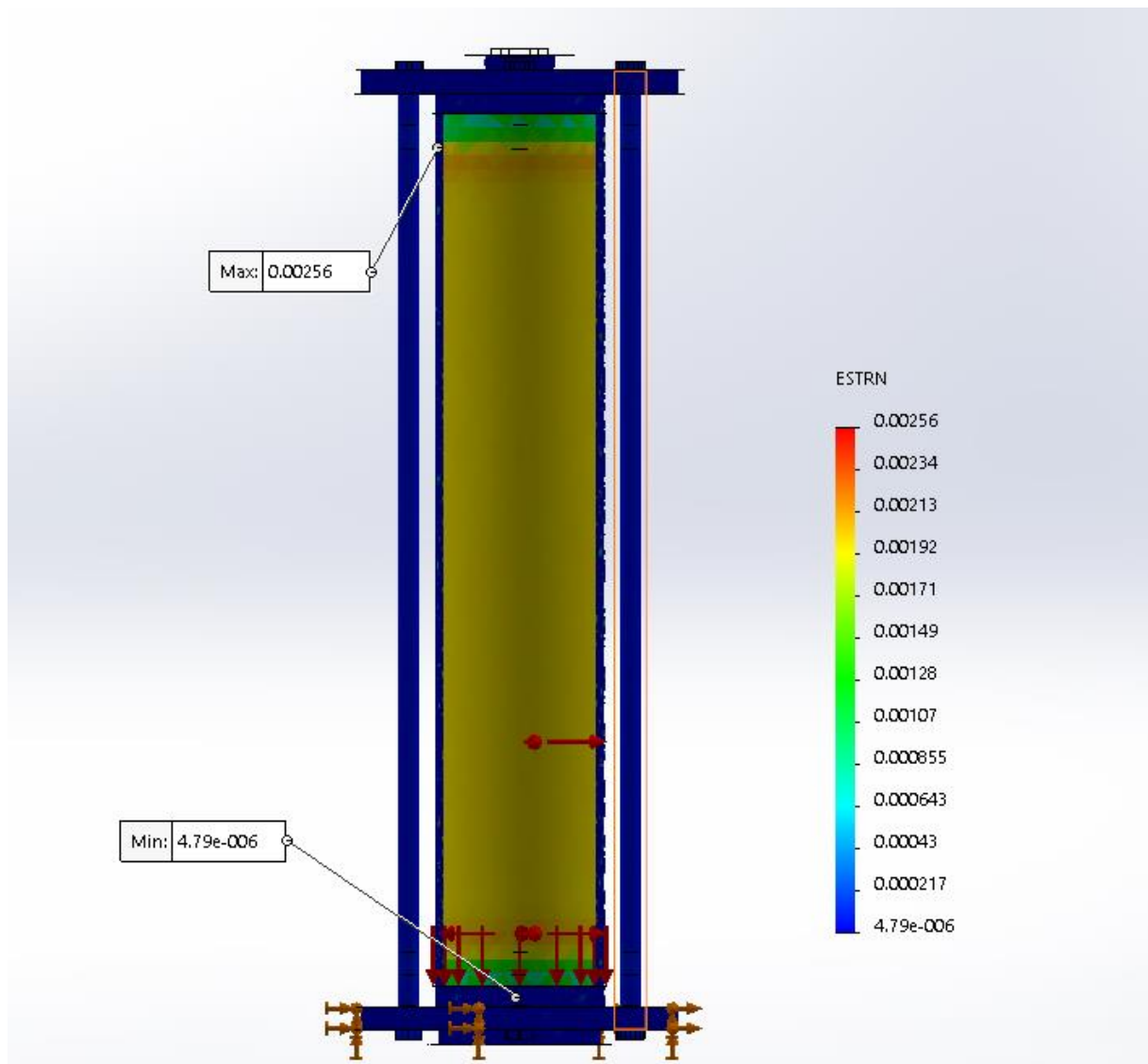
Berikut di bawah ini merupakan titik maksimal dan titik minimal dari *stress*, *displacement*, dan *strain* untuk tabung dengan material ST 37-*Cotton Fiber*.



Gambar 3.19 Titik maksimal dan titik minimal tegangan yang terjadi pada bejana dengan material ST 37-Cotton Fiber

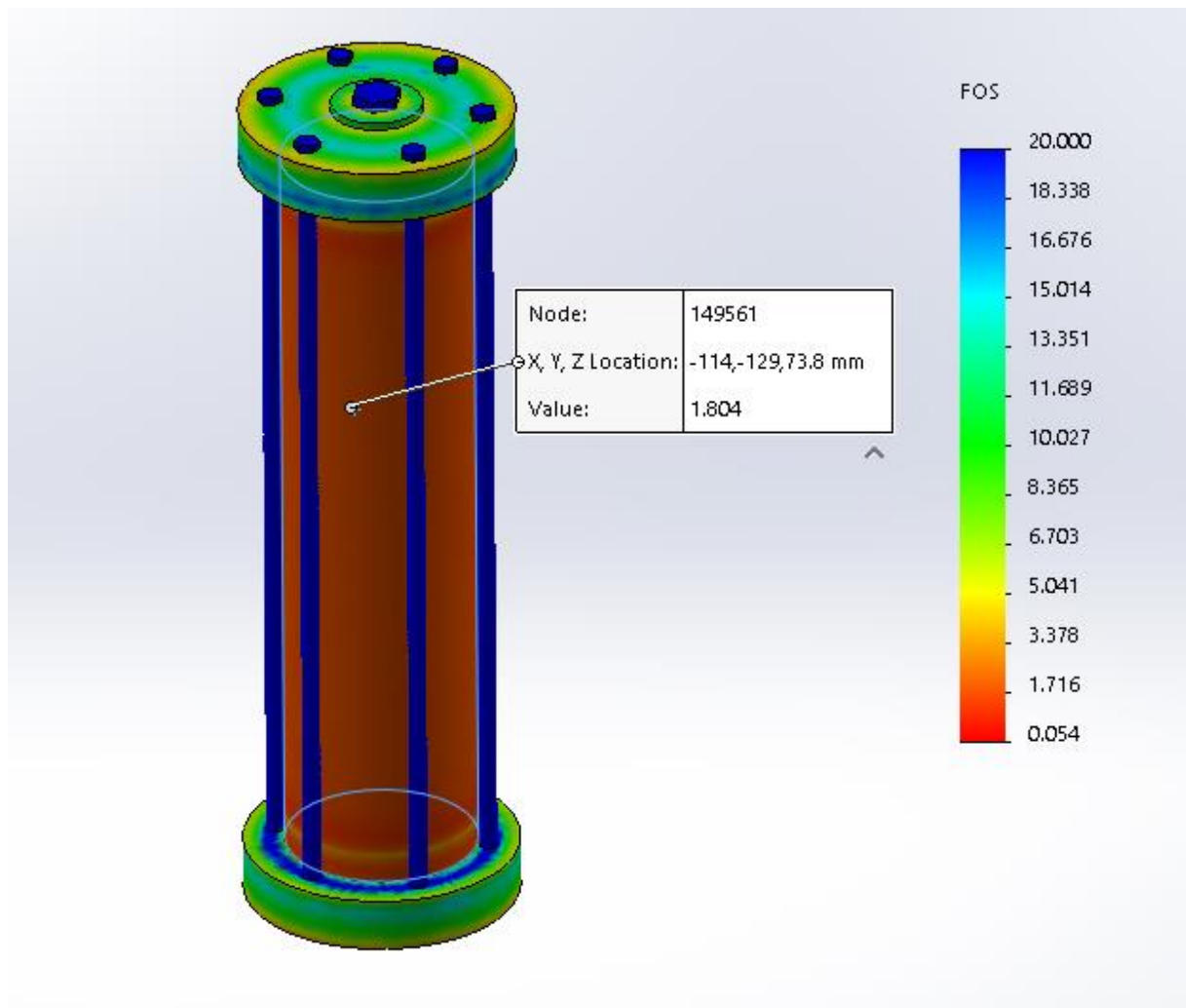


Gambar 3.20 Titik maksimal dan titik minimal *displacement* yang terjadi pada bejana dengan material ST 37-Cotton Fiber



Gambar 3.21 Titik maksimal dan titik minimal regangan yang terjadi pada bejana dengan material ST 37-Cotton Fiber

Adapun di bawah ini desain bejana tekan dengan material aluminium tanpa komposit yang telah disimulasikan dan dilihat hasil dari *safety factor*-nya.



Gambar 3.22 FOS pada bejana tekan dengan material aluminium tanpa komposit